



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Patentschrift
10 DE 196 12 846 C 2

51 Int. Cl. 7:
G 02 B 21/00
G 02 B 21/24

21 Aktenzeichen: 196 12 846.3-42
22 Anmeldetag: 30. 3. 1996
43 Offenlegungstag: 2. 10. 1997
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 20. 4. 2000

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Carl Zeiss Jena GmbH, 07745 Jena, DE

72 Erfinder:

Baumann, Hans-Georg, Dipl.-Phys., 07749 Jena, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 44 19 940 A1
US 51 61 052

Bedienungsanleitung für das CSM (Confocal Scan
Modul) von Carl Zeiss Jena (veröff. im Dez. 1995);

54 Anordnung zur Erzeugung eines definierten Farblängsfehlers in einem konfokalen mikroskopischen Strahlengang

57 Anordnung zur Erzeugung eines definierten Farblängsfehlers in einem konfokalen mikroskopischen Strahlengang, bestehend aus einer im Abbildungsstrahlengang einem Mikroskopobjektiv nachgeordneten Zusatzoptik, die diesen Farblängsfehler aufweist, wobei das Mikroskopobjektiv das Objekt vorzugsweise in Unendliche abbildet und die Zusatzoptik im parallelen Strahlengang zwischen dem Mikroskopobjektiv und einer ein Zwischenbild erzeugenden Linse angeordnet ist. Besonders vorteilhaft ist die Zusatzoptik in den Strahlengang ein- und ausschwenkbar ausgebildet, wobei mehrere Zusatzoptiken wahlweise in den Strahlengang einschenkbar sein können.

DE 196 12 846 C 2

DE 196 12 846 C 2

Optische Systeme, die Linsen enthalten, weisen Bildfehler auf, die je nach Korrektionszustand mehr oder weniger gut korrigiert sind.

- 5 Es gibt aber auch Anwendungen, bei denen ein optisches System zumindest in Teilbereichen einen vorgegebenen Farblängsfehler aufweisen muß, ohne andere Bildfehler, besonders auch ohne Farbquerfehler im Bildfeld, zu erzeugen, z. B. in Geräten, die verschieden tief liegende Objektstrukturen in unterschiedlichen Farben in einer festen Bildebene abbilden sollen.

In WO 92/01965 A2 ist zu diesem Zweck in einer Anordnung zur simultanen konfokalen Bilderzeugung ein Objektiv mit hoher chromatischer Aberration vorgesehen.

Dies ist auch Gegenstand der DE 44 19 940 A1.

Für diese Anordnungen müßten spezielle Objektive, die im übrigen bildfehlerfrei sein müssen, entwickelt werden.

Im "Handbook of Confocal Microscopy", Plenum Press, New York, London 1995, S. 263, 264 sind gleichfalls eigens konstruierte Objektive vorgesehen, die aber bezüglich ihrer numerischen Apertur nicht optimal sein können.

- 15 Für verschiedene "Flächenprofiltiefen" müßten jeweils spezielle Objektive entwickelt werden.

US 5161052 beschreibt ein Stereomikroskop mit einem Spiegelobjektiv vom Schwarzschildtyp in Abbildungsrichtung vorgeschalteten Aplanaten.

Eine Tubusoptik ist vorgesehen, um die vom Aplanaten erzeugten Bildfehler zu kompensieren.

Eine Variation eines voreingestellten Farbfehlers ist wiederum nur mit großem Aufwand möglich.

- 20 Einer vorveröffentlichten Bedienungsanleitung des ZEISS-CSM (Confocal Scan Modul) ist zu entnehmen, daß zur Erzeugung eines vorgegebenen Farblängsfehlers eine zweilinsige Zusatzoptik in den Strahlengang zwischen Objektiv und Tubuslinse einbringbar ist.

Diese Zusatzoptik beeinflusst jedoch die Abbildung durch weitere Abbildungsfehler.

- 25 Aufgabe der Erfindung war es daher, in einer mikroskopischen Anordnung mit geringem Aufwand einen vorgegebenen Farblängsfehler zu erzeugen, ohne andere Bildfehler hervorzurufen.

Diese Aufgabe wird mittels einer die Merkmale des Anspruchs 1 aufweisenden Anordnung gelöst.

Bevorzugt ist die erfindungsgemäße Zusatzoptik aus dem Strahlengang ausschwenkbar.

Vorteilhaft wird die Zusatzoptik zwischen dem Objektiv und einer Tubuslinse zur Erzeugung eines Zwischenbildes angeordnet, wobei das Objekt durch das Objektiv ins Unendliche abgebildet wird.

- 30 Eine erfindungsgemäße Zusatzoptik kann jedoch ebenso einem das Objekt direkt in eine konfokale Blendenebene abbildenden Objektiv nachgeordnet werden.

So treten die Strahlen jedes Objektpunktes einer mittleren Wellenlänge parallel in die Zusatzoptik ein und verlassen sie wieder parallel, wobei die Strahlen tiefer liegender Objektstellen einer längeren Wellenlänge und höher liegender Objektstellen einer kürzeren Wellenlänge ebenfalls die Zusatzoptik parallel verlassen und im Bild somit alle scharf abgebildet werden.

- 35 Auf diese Weise sieht der Beobachter gleichzeitig und scharf Objektpunkte in verschiedenen Ebenen in verschiedenen Farben und erhält damit eine wesentlich vergrößerte Tiefenschärfe.

Daß die nicht parallel austretenden Strahlen anderer Wellenlängen anderer Objektiefen nicht zur Abbildung beitragen, liegt am Wesen der konfokalen Abbildung, die durch einen geeigneten Aufbau, wie durch das Lochsystem einer Nipkowscheibe im Zwischenbild oder durch ein Linsenarray, das nur Bildpunkte geringen Durchmessers aus dem Zwischenbild durch eine gemeinsame Lochblende abbildet, charakterisiert ist. Bei der erfindungsgemäßen Zusatzoptik wird eine Brennweite von unendlich für eine mittlere Wellenlänge, z. B. 546 nm realisiert, für längere Wellenlängen eine negative Brennweite und für kürzere Wellenlängen eine positive Brennweite, jeweils im Meterbereich für den oben angegebenen Fall der Farb-Höhen-Zuordnung am Mikroskopobjekt (bzw. umgekehrt für entgegengesetzte Zuordnung).

- 45 Damit würde im Falle eines konfokalen Mikroskops die Objekt-Tiefendiskriminierung mittels Farben nicht dem Zufall farbig nicht voll auskorrigierter Objektive überlassen sein, sondern es können höchstkorrigierte Epiplan-Apochromate eingesetzt werden, mit denen dann erstens eine exakte Zuordnung von Farben zu Objektdetail-Tiefen wie bei Gelände-Höhenschnitten mittels Farben, z. B. blau - Bergspitzen, grün - Tallagen, rot - unter Meeresboden, erfolgen kann und zweitens die Farben als Spektralfarben gut differenzierbar sind und nicht Mischfarben zufälliger Rest-Farblängsfehler sind.

Beim erfindungsgemäßen optischen System zur Erzeugung eines vorgegebenen Farblängsfehlers sind die anderen Bildfehler, besonders auch Farbquerfehler bzw. die chromatische Vergrößerungsdifferenz, Wölbung, Koma, Astigmatismus und Verzeichnung gut korrigiert.

- 55 Für den optimalen Einsatz im Mikroskop soll die Länge der Zusatzoptik 30 mm nicht überschreiten, um z. B. als Tubuslinsen-Wechselsystem einsetzbar zu sein. Weitere Vorteile und Wirkungen der Erfindung werden im Folgenden anhand der dargestellten Ausführungsbeispiele näher erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1: Die Gesamtanordnung eines erfindungsgemäßen konfokalen Direktsichtmikroskops

Fig. 2: Den Aufbau einer erfindungsgemäßen Zusatzoptik

- 60 Fig. 3: Den Aufbau einer weiteren erfindungsgemäßen Zusatzoptik

Fig. 4: Eine eingliedrige Zusatzoptik

In Fig. 1 ist eine Beleuchtungsoptik 1 vorgesehen, die eine Lichtquelle 2, eine Leuchtfeldblende 3 und eine Aperturblende 4 beinhaltet und über einen Strahlenteiler 5 in Richtung einer im Strahlengang geneigt angeordneten Lochmaske 6 nach Art einer Nipkowscheibe so geführt wird, daß auf der Oberseite der Lochmaske 6 ein Bild der Leuchtfeldblende 3 entsteht.

- 65 Lochmaske 6 und Leuchtfeldblende 3 werden durch eine Tubuslinse 7 und ein Objektiv 8 in die Ebene eines betrachteten Objektes 9 abgebildet, das wiederum auf die Lochmaske zurück abgebildet wird (konfokale Abbildung).

Die Lochmaske 6 wird durch einen Motor 10 in eine Drehbewegung versetzt, so daß das auf ihr befindliche Lochmu-

ster sich über die Objektebene bewegt.

Die vom Objekt 9 reflektierten Strahlen treten wiederum durch die Löcher der Lochmaske 6 hindurch und passieren den Strahlteiler 5.

Die Ebene der Lochmaske wird mit dem Bild des Objektes 9 über eine Linse 11 sowie ein Bauernfeindprisma 12 in ein Okular 13 abgebildet. Im Strahlengang vor und hinter der Lochmaske 6 sind entgegengesetzt orientierte keilförmige Prismen 14, 15 vorgesehen, die die Lochmaske 6 im Strahlengang optisch aufrichten.

Eine eingliedrige Zusatzoptik 16 oder eine zweigliedrige Zusatzoptik 17 wird zwischen Objektiv 8 und Tubuslinse 7 auswechsel- und einschiebbar angeordnet, wo das Objekt 9 durch das Objektiv 8 ins Unendliche abgebildet wird.

Auf diese Weise treten die Strahlen jedes Objektpunktes einer mittleren Wellenlänge parallel in die Zusatzoptik 16 oder 17 ein und verlassen sie wieder parallel, wobei entsprechend die Strahlen tiefer liegender Objektstellen einer längeren Wellenlänge und höher liegender Objektstellen einer kürzeren Wellenlänge ebenfalls das Zusatzsystem parallel verlassen und im Bild somit alle scharf abgebildet werden. Daß die nicht parallel austretenden Strahlen anderer Wellenlängen anderer Objektiefen nicht zur Abbildung beitragen, liegt am Wesen der konfokalen Abbildung, die durch einen geeigneten Aufbau, wie durch das Lochsystem einer Nipkowscheibe im Zwischenbild oder durch ein Linsenarray, das nur Bildpunkte geringen Durchmessers aus dem Zwischenbild durch eine gemeinsame Lochblende abbildet, charakterisiert ist.

Die in Fig. 2 und Tabelle 1 sowie Fig. 3 und Tabelle 2 dargestellten Zusatzoptiken bestehen aus zwei Gliedern mit einem Abstand voneinander, der mit den Linsendicken zusammen kleiner gleich 30 mm beträgt.

In Fig. 2-4 sind jeweils aus der Bildmitte kommende Strahlen sb sowie vom Bildrand stammende Strahlen sr dargestellt.

Es können auch eingliedrige Zusatzoptiken eingesetzt werden, die aus einer Kittlinse bestehen und einen vorgegebenen Farbfehler erzeugen, aber Restfehler der chromatischen Vergrößerungsdifferenz und in der Feldkorrektur aufweisen. Ein Beispiel für eine eingliedrige Zusatzoptik ist in Tab. 4 sowie Fig. 4 angegeben. Während bei einer eingliedrigen Zusatzoptik, beispielsweise gemäß Fig. 4, die Farben im Luftraum nach der Zusatzoptik etwas auseinanderlaufen, was zu einem außeraxial andersfarbigen Bild führen kann, werden in den Ausführungen gemäß Fig. 2 und 3 durch das zweite optische Glied die Farben wieder zusammengeführt, so daß für jede Bildtiefe nur eine Farbe auftritt.

Die 2 Glieder gemäß Fig. 2 und 3 weisen nahezu (+/-5%) gleiche Brennweite unterschiedlichen Vorzeichens auf und sind "spiegelentgegengesetzt" aufgebaut, d. h., wie beispielsweise dargestellt, aus je einer Sammel- und Zerstreuungslinse, die in ihrer Gestaltung spiegelsymmetrisch um eine gemeinsame Mitte angeordnet sind, jedoch aus entgegengesetzten Glastypen bestehen, d. h. die Sammellinse des einen Gliedes besteht aus dem gleichen oder ähnlichen Glas wie die Zerstreuungslinse des anderen Gliedes und hat die gleiche oder ähnliche Brennweite, jedoch entgegengesetztes Vorzeichen.

Dabei sind vorteilhaft die Linsen jedes Gliedes aus mindest je einem Kron- und einem Flintglas aufgebaut, d. h. mit großer und kleiner Abbe-Zahl der Farbzerstreuung, was bedeutet, daß jeweils Glas mit hoher Abbescher Zahl v größer 40 und Glas mit niedriger Abbescher Zahl v kleiner 40 eingesetzt wird.

Für die prinzipielle Wirkung und damit für den prinzipiellen Aufbau ist es gleichwertig, in welcher Reihenfolge die einzelnen Linsen eines Gliedes angeordnet sind, auch müssen die Glassorten, Dicken und Radien nicht identisch sein, was zur Anpassung an unterschiedliche Aufgaben ausgenutzt werden kann.

In Fig. 3 und Tabelle 2 ist ein solches System angegeben, bei dem die Reihenfolge von Kron- und Flintglas vertauscht ist vertauscht sind, die Glieder aus unterschiedlichen Gläsern bestehen und andere Durchbiegungen der Linsen aufweisen.

Die optische Wirkung dieser Anordnung ist in Tabelle 3 dargestellt.

Durch den spiegelsymmetrischen Aufbau kompensiert immer die zerstreulnde Linse des einen Gliedes die Wirkung der sammelnden Linse des anderen Gliedes, wodurch Restfehler betreffs Koma und Astigmatismus einer einfachen Kittlinse aufgehoben werden, weiterhin werden die Wölbung bzw. die Petzvalsumme null durch die Gesamtbrennweite unendlich.

Auch die Verzeichnung kompensiert sich durch die entgegengesetzten Vorzeichen der Brennweiten der beiden Glieder, während Farbfehler, wie Farbkoma und besonders chromatische Vergrößerungsdifferenz oder Farbverzeichnung durch den Luftabstand zwischen den beiden Gliedern behoben werden, indem die einzelnen Glieder jedes für sich eine entgegengesetzte und größere chromatische Aberration als die gewünschte Gesamtaberration aufweisen.

Durch unterschiedliche Glastypen der spiegelsymmetrischen Linsen und unterschiedliche geometrische Gestaltung kann der gewünschte Farbfehler bei einer optimalen Feldkorrektur eingestellt werden.

Das Beispiel in Tabelle 1 besteht aus einem Glied G1 positiver Brennweite mit einer ersten Sammellinse L1 und einer ersten Zerstreuungslinse L2, denen ein Glied G2 negativer Brennweite mit einer zweiten Zerstreuungslinse L3 und einer zweiten Sammellinse L4 nachgeordnet ist.

Der vorgegebene Farbblänsfehler ergibt sich aus den unterschiedlichen Radien der Glieder.

Durch die vorteilhafte Bemessung der optischen Parameter sind die Bildfehler wie Farbkoma, Astigmatismus, Gaußfehler und chromatische Vergrößerungsdifferenz ausreichend korrigiert.

Tabelle 1

Brennweiten, Glastypen, Krümmungsradien der Flächen F1–F6 und Dicken d1–d5 für erstes und zweites optisches Glied G1, G2 der Zusatzoptik, die aus Linsen L1, L2 sowie L3, L4 besteht, gemäß Fig. 2:

Glied- Nr.	Brennweite	Linse - Nr.	Brennweite	Glastyp
G 1	+ 988 mm	L 1	+44,6 mm	SFL6
G 2	- 1007 mm	L 2	-45 mm	FK5
		L 3	-60,8 mm	SFL6
		L 4	+68,6 mm	FK5
Flächen- Nr.	Radius	Dicke		
F1	49,3 mm			
d1		2 mm		
F2	-134,6 mm			
d2		1,6 mm		
F3	26,4 mm			
d3		22,6 mm		
F4	-27,0 mm			
d4		1,6 mm		
F5	-61,0 mm			
d5		2 mm		
F6	-21,9 mm			

Die Zusatzoptik gemäß Fig. 3 besteht aus einem optischen Glied G3 negativer Brennweite und einem optischen Glied G4 positiver Brennweite, die aus Zerstreuungslinse L5, Sammellinse L6 sowie Zerstreuungslinse L7 sowie Sammellinse L8 aufgebaut sind. Hierbei entsteht der vorgegebene Farb längsfehler sowohl durch leicht unterschiedliche Gläser in den beiden Gliedern als auch durch verschiedene Radien.

Tabelle 2

Brennweiten, Glastypeen, Krümmungsradien der Flächen F1–F6 und Dicken d1–d5 für erstes und zweites optisches Glied G3, G4 der Zusatzoptik, die aus Linsen L5, L6 sowie L7, L8 besteht, gemäß Fig. 3:

Glied- Nr.	Brennweite	Linse -Nr.	Brennweite	Glastype	
G3	-213 mm	L 5	-36 mm	BaK1	5
G4	+211 mm	L 6	+41 mm	SFL6	10
		L7	-41 mm	SF10	
		L8	+32 mm	Baf52	
Flächen- Nr.	Radius	Dicke			15
F1	51.6 mm				
d1		1.6 mm			20
F2	14.6 mm				
d2		2.1 mm			
F3	24.4 mm				25
d3		20.8 mm			
F4	26.0 mm				
d4		2.2 mm			30
F5	13.4 mm				
d5		3.2 mm			
F6	38.7 mm				35

Tabelle 3

Differenzen der Objektebenenlagen für 4 Wellenlängen bei verschiedenen Objektivergrößerungen für das Beispiel gemäß Fig. 3 und Tabelle 2:

Vergrößerung	Wellenlänge	436 nm	480 nm	546 nm	644 nm	
10x		0.067 mm	0.037 mm	0 mm	-0.034 mm	40
20x		0.017 mm	0.0093 mm	0 mm	-0.0084 mm	45
50x		0.0027 mm	0.0015 mm	0 mm	-0.0013 mm	50
100x		0.00067 mm	0.00037 mm	0 mm	-0.00034 mm	55
150x		0.00030 mm	0.00016 mm	0 mm	-0.00015 mm	60
						65

Tabelle 4

Aufbau aus zwei Linsen L9, L10:

Gesamtbrennw.	Linsen - Nr.	Brennw.	Glastyp	Abbesche Zahl
44581 mm	L 9	- 21,52	BaF52	46,1
	L 10	21,98	F5	37,8

10

Fläche Nr.	Radius	Dicke
------------	--------	-------

F1	-110,593	
----	----------	--

15

d1		2,5
----	--	-----

F2	15,070	
----	--------	--

d2		3,6
----	--	-----

20

F3	- 105,929	
----	-----------	--

Die Erfindung ist nicht an die dargestellten Ausführungsformen gebunden. Insbesondere können anders aufgebaute Zusatzoptiken, beispielsweise diffraktive Elemente oder Glasplatten eingesetzt werden.

25

Patentansprüche

30

1. Anordnung zur Erzeugung eines definierten Farblängsfehlers in einem konfokalen Mikroskop,
 - mit einer das Objekt (9) durch eine Objektivlinse (8) hindurch beleuchtenden, mehrfarbigen Lichtquelle (2),
 - mit einer gemeinsamen konfokalen Lochblende (6) für den Beleuchtungs- und den Detektionsstrahlengang
 - und mit einer Zusatzoptik zwischen der Objektivlinse (8) und der konfokalen Lochblende (6), die am Ort des Objektes (9) den Farblängsfehler erzeugt und dabei unterschiedliche Objekthöhen in den unterschiedlichen Farben der Lichtquelle (2) beleuchtet,
 - wobei die Zusatzoptik aus einer Sammel- und einer Zerstreuungslinse besteht, **dadurch gekennzeichnet**,
 - daß zwischen die Zusatzoptik und die Objektivlinse (8) eine zweite, ebenfalls aus einer Sammel- und Zerstreuungslinse bestehende Zusatzoptik eingebracht ist,
 - daß die Zerstreuungslinse der ersten Zusatzoptik und die Sammellinse der zweiten Zusatzoptik und die Sammellinse der ersten Zusatzoptik und die Zerstreuungslinse der zweiten Zusatzoptik jeweils aus Kronglas oder Flintglas besteht
 - daß die Brennweiten der beiden Zusatzoptiken unterschiedliche Vorzeichen aufweisen und innerhalb von $\pm 5\%$ übereinstimmen,
 - wobei die beiden Zusatzoptiken sich in ihren Farb- und Abbildungsfehlern bis auf den Farblängsfehler gegenseitig aufheben.
2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die beiden Zusatzoptiken aus dem Strahlengang ausschwenkbar ausgebildet sind.

45

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

50

55

60

65



